MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL HUMEDAL DE JABOQUE – BOGOTÁ, D.C. (COLOMBIA)

Hydrologic modeling of Wetland Jaboque – Bogota, D.C. (Colombia)

Julio Beltrán-V.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia.
Programa doctorado en Ciencias-Biología, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá D.C., Colombia. jebeltranva@unal.edu.co; jebelatran@udistrital.edu.co

J. Orlando Rangel-Ch.
Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá D.C., Colombia. jorangelc@unal.edu.co; jorangelc@gmail.com

RESUMEN

Se propone un modelo de simulación dinámico para explicar los procesos hidrológicos del humedal Jaboque – Bogotá D.C., Colombia, en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo incluye los caudales de entrada y salida de agua para cada una de las secciones del humedal. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales. Se utilizó el método Euler de integración con el programa computacional Stella 9.1®. El comportamiento hidrológico del humedal tiene una alta dependencia de los aportes de la cuenca aferente que a su vez obedecen fundamentalmente a las condiciones climáticas de la cuenca. En el año 1992 (año Niño) la precipitación fue 432.7 mm/año con una descarga de agua estimada de la cuenca aferente de 905 225 m^3/año, siendo el valor más bajo en los últimos 39 años. En el 2010 (año Niña) la precipitación anual fue de 1251.3. mm, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m^3/año, que corresponde al dato más alto para el mismo periodo. La comparación entre los caudales de entrada y salida del humedal Jaboque muestran una diferencia bruta de 82 165 m^3/mes para un total anual de 985 980 m^3/año. El tiempo hidráulico de retención modelado (THR) se estimó en quince para la primera sección, 36 y 42 días para la segunda y tercera sección. El promedio en el humedal fue de 93 días/año. El análisis de sensibilidad mostró que entre los limites de 800 mm/año y 900 mm/año, valores entre los cuales oscila el promedio multianual de la precipitación, el comportamiento del THR es de 13 a 15 días/año en la primera sección, en la segunda de 32 a 36 días/año y la tercera de 38 a 43 días. Se corrobora así la relación que existe entre la precipitación y los factores morfométricos del humedal.

Palabras clave. Humedales, hidroperíodo, modelación, tiempo hidráulico de retención, Jaboque.

ABSTRACT

We propose a dynamic simulation model to explain the hydrological processes in three sections of the wetland Jaboque - Bogota, Colombia, with particular physical and chemical characteristics. The model includes the inflow and outflow for each of the sections of the wetland. The dynamic modeling was based on differential equations.

Euler method was used for integration with Stella 9.1 ® computer program. The hydrological behavior of the wetland has a high dependence on afferent input from the basin, which in turn is mainly due to the climatic conditions of the basin. In 1992 (El Niño year), rainfall was 432.7 mm / year with an estimated water discharge of the afferent basin of 905,225 m^3/year, which is the lowest value in the last 39 years. In 2010 (La Niña year) the annual rainfall was 1251.3 mm, with a discharge of the afferent basin of 2,471,634 m^3/year, that is the highest value for the same period. The comparison between input and output streams of wetland Jaboque show a gross difference of 82 165 m^3 per month, that reach for the whole year a total of 985,980 m^3. The hydraulic retention time (THR) was estimated in 15 days for the first section, 36 days for the second and 42 days for the third section. The average retention time in the wetland was 93 days. Sensitivity analysis showed that between rain values of 800 mm/year and 900 mm/year, range that include the multiyear average precipitation, the behavior of the THR is 13 to 15 days in the first section, 32 to 36 days in the second section and the 38 to 43 days in the third section. These results corroborate the relationship between precipitation and wetland morphometric factors.

Key words. Hydroperiod, hydraulic retention time, modeling, wetlands, Jaboque.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones hidrológicas pueden modificar o cambiar directamente las propiedades físicas y químicas del agua como la temperatura, el pH, la disponibilidad de nutrientes y los tiempos hidráulicos de retención (Wetzel 2001, Hakanson 2005, Jørgensen 2008). El estudio de los procesos hidrológicos en humedales naturales y artificiales ha permitido desarrollar propuestas exitosas para la restauración y para la creación de este tipo de sistemas (Mitsch & Day 2004, Zhang & Mitsch 2005). La modelación y la simulación de los procesos hidrológicos ayuda en la comprensión de los procesos bióticos, los ciclos geoquímicos, los ciclos de nutrientes, la dinámica de la vegetación y el comportamiento trófico (Bradley & Gilvear 2000, Hupp 2000, Quinn & Hanna 2003, Spieles & Mitsch 2003). El hidroperiodo afecta el nivel de agua en un humedal y es considerado el factor dominante en el control de la composición florística de la comunidades de plantas acuáticas (Duever *et al.* 1988). Cuando las condiciones hidrológicas en un humedal cambian ligeramente, la biota puede responder con cambios en la riqueza de especies y en la productividad del ecosistema (Mitsch *et al*. 2009). Fundamentalmente el hidroperiodo está conformado por la intensidad de la inundación (altura del nivel del agua en el humedal), el tiempo de duración (tiempo que permanece cubierto de agua), la frecuencia (número de veces que el sistema se inunda) y la estacionalidad (época del año cuando se produce la inundación). El hidroperiodo, entonces, define el patrón estacional del nivel del agua en un humedal.

METODOLOGÍA

Generalidades del área de estudio

El humedal de Jaboque se localiza en la localidad de Engativá al occidente de la ciudad de Bogotá D.C, Colombia (Figura 1). Pertenece a la cuenca del río Juan Amarillo, entre el Aeropuerto Internacional El Dorado y la Autopista Medellín. Limita por el occidente con el río Bogotá, por el sur con los barrios Engativá, Las Mercedes, Puerto Amor, Bolivia, Villa del Mar y la carretera que une a Engativá con el parque La Florida. Por el Oriente limita con los barrios Álamos Norte, Álamos Sur y Bosques de Mariana entre otros. Por el Norte con

los barrios Villas de Granada, Los Ángeles y áreas destinadas al pastoreo y cultivo. Abarca aproximadamente 57 hectáreas y presenta una forma alargada en dirección Sur-Oriente-Noroccidente. En las últimas cuatro décadas el humedal del Jaboque ha visto reducida su extensión por la variación del drenaje, la colmatación por cargas orgánicas de las aguas y vertimientos, ocupación por construcción y fraccionamiento del mismo. Esta situación ha incidido para que el humedal haya disminuido su oferta de servicios ambientales y se hayan alterado atributos relacionados con su biota, su composición y su estructura (Rangel, 2005)

Método de simulación

Las simulaciones se realizaron usando Stella 9.1®, software que se ha utilizado ampliamente para realizar modelos hidrológicos y ecológicos (Duever *et al.* 1988, Mancera *et al.* 2003, Zhang & Mitsch 2005, Hakanson 2005 entre otros). Los datos morfométricos fueron tomados por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia - la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB, y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, en el marco del proyecto Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque , Rangel (2005). Se utilizó el sistema de interfaz de Stella para simular cambios mensuales y condiciones extremas de mayor inundación y menor precipitación. De igual manera, para realizar los análisis de sensibilidad del modelo se relacionó la precipitación con las variables dependientes como volumen, tiempo hidráulico de retención (THR) y profundidad. Para verificar su carácter determinístico y realizar la validación del modelo se realizaron regresiones simples lineares (Legendre & Legendre 1998) que permitieron comparar los datos medidos con los resultados modelados. Para evaluar la fortaleza del modelo, se determinó el error relativo (Bryhn & Hakanson, 2007) y para comprobar su carácter predictivo se realizó el análisis de sensibilidad (Jørgensen & Bendoricchio, 2001; Håkanson, 2004).

Estructura del modelo de simulación dinámica

A partir del análisis de balance de masas se estimaron los caudales de entrada y salida del humedal (Tablas 1 y 2) y se determinó la estructura (Anexo 1) de un modelo dinámico de simulación para estimar el comportamiento hidrológico mensual del humedal (Mitsch & Gosselink 2000, Zhang & Mitsch 2005, Acreman *et al.* 2007) Las ecuaciones se ajustaron de la siguiente manera:

$$dv/dt = \int ent(t) - \int sal(t) \quad (1)$$

$$\int ent(t) = P(t) + Si(t) \quad (2)$$

$$\int sal = So(t) + Et(t) \quad (3)$$

Donde:
dv/dt = Tasa de cambio del volumen agua, si dv/dt =0
∫ent (t) = Entradas
∫sal (t) = Salidas
Si (t) = Caudal mensual promedio
P (t) = Precipitación media mensual
So (t) = Caudal promedio salida
Et (t) = Evapotranspiración mensual

Tabla 1. Variables utilizadas en el modelo - Flujos de entrada y salida de agua del humedal Jaboque.

NOMBRE	ORIGEN DE ENTRADAS	UNIDADES	DIRECCIÓN DE SALIDAS	UNIDADES
Sección 1	Cuenca aferente. Área. Precipitación efectiva sección 1	km^2 $mm/mes/m^2$	Entrega a la sección 2 Evapotranspiración, área sección 1	m^3/mes $mm/mes/m^2$
Sección 2	Flujo sección 1 a sección 2 Precipitación efectiva sección 2	m^3/mes $mm/mes/m^2$	Flujo de sección 2 a sección 3 Evapotranspiración, área sección 2	m^3/mes $mm/mes/m^2$
Sección 3	Flujo sección 2 a sección 3 Precipitación efectiva sección 3	m^3/mes $mm/mes/m^2$	Flujo salida río Bogotá Evapotranspiración, área sección 3	m^3/mes $mm/mes/m^2$

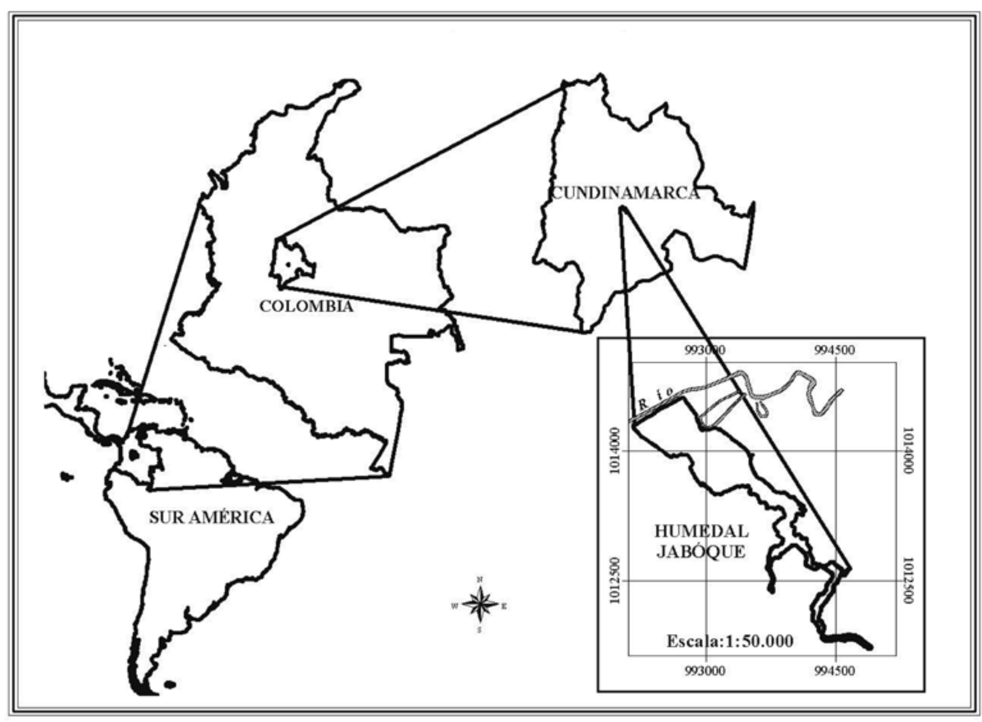


Figura 1. Localización geográfica del humedal de Jaboque. Fuente: Sierra & Monsalve (2005).

Tabla 2. Variables del modelo, unidades y fuentes.

HUMEDAL JABOQUE	VARIABLES E ÍNDICES	VALORES/ UNIDADES	FUENTE
Sección 1	Aporte cuenca aferente (Canales los Ángeles + Carmelo) = Flujo de entrada	m^3/mes	Cálculo a partir de datos de IDEAM Estimación
	Precipitación efectiva (área de sección)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Evapotranspiración (ET)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Profundidad	m/mes	Datos de campo U. Nacional – Adesa/simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días	Simulación
	Área	m^2/mes	Datos de campo U. Nacional / Simulación
	Volumen	m^3/mes	Simulación
	Salida a Sección 2	m^3/mes	Simulación
Sección 2	Flujo entrada Sección 1	promedio m^3/año	Simulación
	Precipitación efectiva	mm/mes	Fuente IDEAM
	Evapotranspiración (ET)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Profundidad	m/mes	Datos de campo U. Nacional – Adesa/simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Simulación
	Área	m^2/mes	Datos de campo U. Nacional / Simulación
	Volumen	m^3/mes	Simulación
	Salida a Sección 3	m^3/mes	Simulación
Sección 3	Flujo entrada Sección 2	m^3/mes	Simulación
	Precipitación efectiva	mm/mes	Fuente IDEAM
	Evapotranspiración (ET)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Profundidad	m/mes	Datos de campo U. Nacional – Adesa /simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días	Simulación
	Área	m^2/mes	Datos de campo U. Nacional / Simulación
	Volumen	m^3/mes	Simulación
	Salida a río Bogotá	m^3/mes	Simulación

Entradas

El caudal de entrada al humedal se calculó a partir de los aportes de la cuenca aferente (m^3/mes) que se recogen por medio de los canales de los Ángeles y Carmelo, y que transportan el caudal de agua hacia el interior del humedal. Para los caudales de entrada de cada una de las secciones se tuvo en cuenta el promedio mensual de precipitación efectiva (p.e.-mm) sobre cada sección, más el caudal proveniente de cada sección.

Precipitación (P) mensual: Los datos de precipitación media mensual se tomaron de la estación hidrometeorológica Aeropuerto El Dorado (IDEAM) entre el período de enero 1972 a diciembre 2010. Se utilizaron para elaborar la caracterización climática de la zona del humedal y para alimentar el modelo de simulación.

Salidas

Para la predicción de las pérdidas de agua por evapotranspiración para cada sección del humedal se utilizo la relación planteada por Kadlec (1990, 1994) y Werner & Kadlec (1996), la cual se basa en la determinación de las tendencias de evapotranspiración para sistemas de tratamiento en humedales. La evapotranspiración real (ET) es el volumen de agua que realmente sale del sistema en una unidad de tiempo y depende de que exista suficiente agua disponible para evaporar.

$$Et = Ket*ETF*SA \quad (4)$$

K_e = Constante de evapotranspiración mm/mes
ETF = Factor de corrección
SA = Superficie de la sección m^2

Supuestos del modelo

Se asumen los siguientes supuestos con el fin de delimitar el alcance del modelo y su posterior generalización o aplicación:

- En cada una de las secciones del humedal se asume su profundidad media.
- El caudal de agua al humedal proviene básicamente de la descarga de la cuenca aferente y de la precipitación efectiva en cada una de las secciones.
- La descarga de la cuenca aferente se calculó con base en la relación existente entre precipitación y área en km^2 de la cuenca aferente (Hakanson & Peters,1995).
- No se tienen en cuenta los planos de desborde del humedal, debido a la construcción de canales perimetrales en los dos primeros tercios y las obras de infraestructura o terraplenes en el tercio bajo, calle sesenta y cuatro, costado sur y terraplén con ciclo vía, jarillón río Bogotá, barreras artificiales que impiden la inundación y generan un sistema hidrológico de volumen controlado.
- Todas las simulaciones se realizaron con los promedios mensuales y anuales de los datos climatológicos entre los años 1972 – 2010.
- Dadas las condiciones arcillosas en el sustrato de la zona (Van der Hammen, 1995) Muñoz & Jaramillo 2005), se asume que la infiltración es mínima y que no existen caudales de aguas subterráneas hacia el cuerpo de agua del humedal.

El modelo de simulación hidrológica

Se considera el tiempo de residencia hidráulica (THR) como uno de los factores críticos para explicar la retención de nutrientes en los humedales (Knight 2000, Werner & Kadlec 2000). El THR se define como el tiempo de retención de un volumen de agua en un cuerpo de agua antes de salir del sistema (Werner & Kadlec 2000). En la construcción de humedales para tratamiento de aguas residuales el THR es una de las variables principales utilizadas para determinar el diseño de un humedal artificial. El THR puede calcularse de acuerdo con los lineamientos de Almendinger (1999), Håkanson (1999) y Werner & Kadlec (1996).

$$THR = V = \frac{L*W*D}{Q*T^{1}} \quad (5)$$

Donde:
V = Volumen de la sección
T = Duración del caudal
L = Longitud del humedal
W = Ancho promedio
D = Profundidad promedio
Q = Caudal que ingresa al sección

A partir de esta ecuación se simplifica el procedimiento y de acuerdo con Håkanson & Boulion (2002), Håkanson (2004) y Zhang & Mitsch (2005), el THR se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$THR = V/Q \quad (6)$$

Donde THR es el tiempo hidráulico de retención (días o años), V es el volumen de agua (m^3), Q es el caudal promedio anual (m^3/año), en términos de entradas y salidas del sistema.

Submodelo de descarga de la cuenca aferente del humedal de Jaboque

Para la predicción de los aportes de agua provenientes de la cuenca aferente del humedal se ajustó el submodelo de descarga (Hakanson & Peters 1995). Se calcularon las descargas medias mensuales (Q) que llegan al humedal Jaboque a través de los canales Carmelo y Los Ángeles. Para esto se tuvieron en cuenta las siguientes variables: área de la cuenca aferente (5.8 km^2) y escorrentía (0.01 m^3/km^2), calculados por los estudios técnicos para la restauración hidrodinámica y ecológica del humedal Jaboque (Universidad Javeriana 2007), y la precipitación media anual (P) establecida a partir de los datos de precipitación de la Estación Aeropuerto El Dorado 1979 – 2010, del IDEAM.

$$Q = ADA* (P/817.7) *0.01*60*60*24*365 \quad (7)$$

$$Q = 5.8\ km^2\ (P/817.7) *0.01*60*60*24*365 \quad (8)$$

Donde:
Q = Caudal cuenca aferente m^3/mes (Tabla 3)
ADA = Área de la cuenca aferente
P = Precipitación media anual

RESULTADOS

Descarga de la cuenca aferente

El comportamiento de la descarga de la cuenca aferente del humedal (Q en m^3/mes), se asimila al patrón pluviométrico de la zona (Figura 2 y Tabla 3), donde se muestra la relación existente entre la magnitud de las descargas en m^3 y la precipitación en mm, entre los años 1990 y 2010. Se evidencia que las variaciones de la descarga de la cuenca aferente responden al comportamiento de la precipitación; valores extremos de precipitación corresponden también a montos extremos en los caudales. En los últimos 39 años se han presentado variaciones significativas en el comportamiento de la precipitación que obviamente afectan la descarga de la cuenca aferente al humedal. Los años con mayores precipitaciones fueron 1979, 1984, 1990, 1995, 1999, 2004, 2006, 2008 y 2010. En estos años la precipitación promedio anual varió entre 920 mm y 1250 mm, con descargas superiores a 1 933 408 m^3/año, que llegaron hasta 2 471 654 m^3/año. Los años con menores precipitaciones fueron 1977, 1978, 1980, 1985, 1989, 1996, 2001 durante los cuales la precipitación promedio anual osciló entre 598.1 mm y 683.3 mm, con descargas que fluctuaron entre 1206 273 m^3/año y 1 432 008 m^3/año. El promedio anual de la precipitación para este periodo fue de 828.86 mm y el promedio de la descarga estimada de la cuenca aferente fue 1 718 646 m^3/año, lo cual evidencia un alta variabilidad entre los valores extremos de la precipitación y la descarga de agua al humedal de Jaboque.

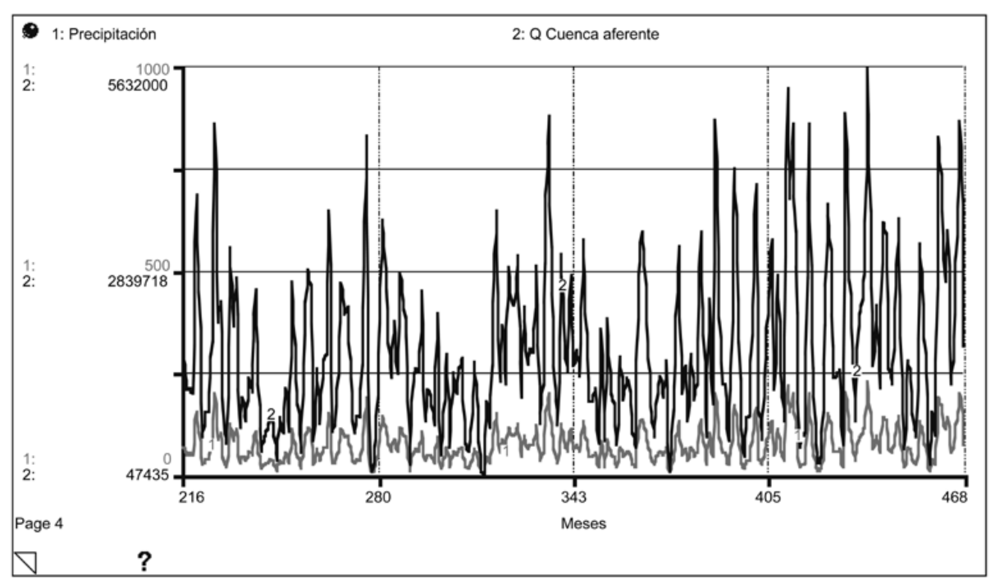


Figura 2. Resultados de la estimación de la precipitación y la modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque.

Promedio multianual, años 1990 – 2010. 1: Precipitación en mm. 2: Q cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m3/mes.

Tabla 3. Precipitación mensual y anual. Descarga anual estimada. Años 1979 – 2010.

Mes / Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prec anual/mm	Descarga anual estimada m3/año
1972	72.1	21.9	57.2	159.4	118.1	58.1	36.7	39.6	17.4	71.6	101.1	28.5	781.7	1 626 326.92
1973	2.9	3.8	50.1	39.3	75	59.5	55.1	57.4	130.3	115.4	105.8	117.3	811.9	1 689 158.00
1974	79.6	100	28.5	83.8	61.3	65.5	15.8	46.8	91.8	100.3	150.6	24	848	1 763 223.92
1975	5.5	32.2	130	57.9	105.3	56.4	60.3	52.2	55.1	160.8	70.7	77.9	864.3	1 798 176.08
1976	31.2	59.9	118.3	122.1	104.4	58.9	17.4	34.7	47.3	140	81.6	49.5	865.3	1 800 256.58
1977	9.1	20.4	72.2	86.4	34.1	15.9	52	52.9	115.7	120.4	82.3	26.9	688.3	1 432 008.00
1978	5.6	25	55.7	121.4	73.5	71.2	52.9	12.9	66.4	102.9	47.4	30.2	665.1	1 383 740.33
1979	27.5	44.8	55	137	84.5	77.5	64.8	114	86.3	133	142	25.4	991.8	2 063 231.83
1980	28.2	63.4	28.9	46	39.5	76.9	10.6	40.3	49.3	62.1	50.7	102	597.9	1 245 387.25
1981	2.5	27.3	13.7	174.6	202.1	78.1	23.7	34.4	51.1	113.4	111.8	25.5	858.2	1 785 485.17
1982	78.5	43.3	86.2	218.1	81.1	15.9	12.8	21.4	14.2	112.7	63.6	44.6	792.4	1 648 588.25
1983	6	18.4	124.4	207.3	120.4	50.3	45.7	34.9	29.3	77	43	132.6	889.3	1 850 188.58
1984	99.6	55.2	65.7	140.1	118	90.5	35.5	73.4	74.9	50.4	86.3	40.2	929.8	1 933 408.58
1985	2.8	5.1	28.3	31.4	118.4	25.3	44.6	95.9	157.9	79.8	73.8	34.7	698	1 452 189.00
1986		112.1	61.2	96.5	74	95.6	36.2	38.3	56.9	217.5	122.3	4	914.6	1 903 033.33
1987	42.8	32.2	25.7	95	113.2	13.8	91.2	25	69.5	148.7	64.2	29.2	750.5	1 467 808.69
1988	13.8	50.5	12.2	143.9	58.7	68.5	46.9	73.2	119.1	117.9	151	78.8	934.5	1 944 227.17
1989	11.7	41	154	32.9	53.8	48.2	39.1	34.9	84.8	82.1	30.7	66.2	679.4	1 412 659.50
1990	48.3	48.9	45.6	155.7	102.5	21.9	35.9	35.8	75.7	195.5	85	97.4	948.2	1 972 730.00
1991	25.5	18.3	126.3	82.6	110	27.1	43.4	31	54.2	47.1	103.9	64.1	733.5	1 526 046.83
1992	14	22.1	26.2	35	28.4	8.8	33.3	24.5	49.7	25.4	108	59	434.4	905 225.50
1993	34.7	13.8	78.6	114.2	106.3	19.7	60.6	29.2	63.8	67.5	146.9	25.5	760.8	1 582 844.42
1994	30.6	65.6	107.1	89.4	94.2	55	24.4	34.5	32.6	93.9	189.1	9.3	825.7	1 715 996.50
1995	3.4	20.7	68.1	142.3	126.2	81.1	55.1	86.7	56.6	112	97.3	78.4	927.9	1 930 496.00
1996	6.5	53.3	60	57.5	102.5	30.6	47.7	43.6	28.7	90.6	12.6	34.7	568.3	1 182 348.25
1997	67.3	16.1	58	46.4	59.7	66	18.8	14	25.1	63	38.1	2.7	475.2	988 653.67
1998	1.9	41.8	27.8	96.2	147.5	52.7	84.1	51.6	115.2	96.3	94.7	122.7	932.5	1 940 066.25
1999	43.4	93.8	62.7	71.2	68.6	116.9	29.8	51.3	140.3	199.3	101.9	47.9	1027.1	2 136 881.50
2000	28.3	123.4	73.9	57.5	110.9	61.6	70.1	55.9	130.6	90.7	41.5	41.1	885.5	1 842 282.75
2001	49.3	19.3	81.9	19.4	87	47.2	40.5	17.7	66.4	43.1	54.2	53.8	579.8	1 206 273.83
2002	26.8	16.8	111.5	134.8	116.3	74.8	39.7	22.5	45.5	55.7	44	64.1	752.5	1 565 576.33
2003	3	24.1	75.4	128	46.4	61.5	31.1	67.6	42.6	54.9	134.8	78.8	748.2	1 556 630.17
2004	22	98.7	40.8	197.7	101.4	51.1	51.2	19.7	59	170	118.6	31.9	962.1	2 001 649.00
2005	11.1	33.2	33.7	93.6	161.3	36.6	21.4	66	97.8	131.3	47.8	111.2	845	1 758 022.58
2006	58.1	31.7	215	154	195	115	16.5	22.7	25.1	196	91.1	30.2	1150.4	2 391 264.25
2007	7.6	10.9	62	150.6	125.4	54.2	56.1	58.9	18	200.6	117.4	82.9	944.6	1 965 240.25
2008	30.5	84.6	93.8	113	226	120	61.5	94.7	48.8	141	134	60	1207.9	2 510 747.42
2009	51.4	91.4	142.8	55.2	15.7	64.1	53.2	28.4	21.5	129.1	95.1	58.4	806.3	1 677 507.08
2010	6.3	36.6	23.2	187	160	108	137	51.8	76.4	133	197	135	1251.3	2 471 634.08
Promedio	28.668	44.14	71.33	107	100.7	58.97	44.94	45.91	66.43	111.3	93.13	57.09	828.9282	1 718 646.51

Variabilidad según valores extremos

Se puede inferir una alta influencia de los valores extremos. El menor valor de precipitación anual se presentó en 1992 y fue de 432.7 mm/año. La descarga calculada de la cuenca aferente fue de 905 225 m^3, que es el valor más bajo en los últimos 39 años. La precipitación más alta (1250.5 mm,) ocurrió en 2010, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m^3. Estos valores afectan de manera significativa la dinámica hidrológica del humedal, ya que se modifica el tiempo hidráulico de retención (Carpenter *et al.* 2008), lo que incide en los procesos geoquímicos y biológicos del humedal. Una situación parecida se presenta actualmente en algunos lagos europeos, que se asocia con fenómenos de cambio climático (Håkanson *et al.* 2003). En la figura 3 y en la tabla 3 se muestran los resultados de la modelación de la precipitación y la descarga de la cuenca aferente para el periodo de 1992 correspondiente al año de máxima sequía, típico representante del fenómeno de El Niño. Se puede apreciar que la curva de la precipitación coincide con la descarga a la cuenca aferente. Predomina un largo periodo seco desde enero hasta la mitad de octubre, cuando se incrementa súbitamente la precipitación. El periodo lluvioso permanece hasta noviembre, lo cual obviamente se refleja en el comportamiento de la descarga de la cuenca aferente.

En la figura 4 se muestran los resultados de la modelación de precipitación en mm y la descarga de la cuenca aferente para el año 2010, correspondiente al año de máxima precipitación La Niña. Se puede apreciar que la marcha mensual de la precipitación coincide con la de la descarga a la cuenca aferente en diciembre – enero, febrero – marzo y agosto – septiembre. Las mayores descargas ocurren en abril, mayo, junio, octubre y noviembre. Al comparar las curvas de descarga al humedal en las dos situaciones extremas se puede apreciar que durante el fenómeno de La Niña fuerte, la descarga se aumentó aproximadamente en un 25% con relación al promedio histórico y de 150% con relación al comportamiento durante un fenómeno de El Niño. Es decir,

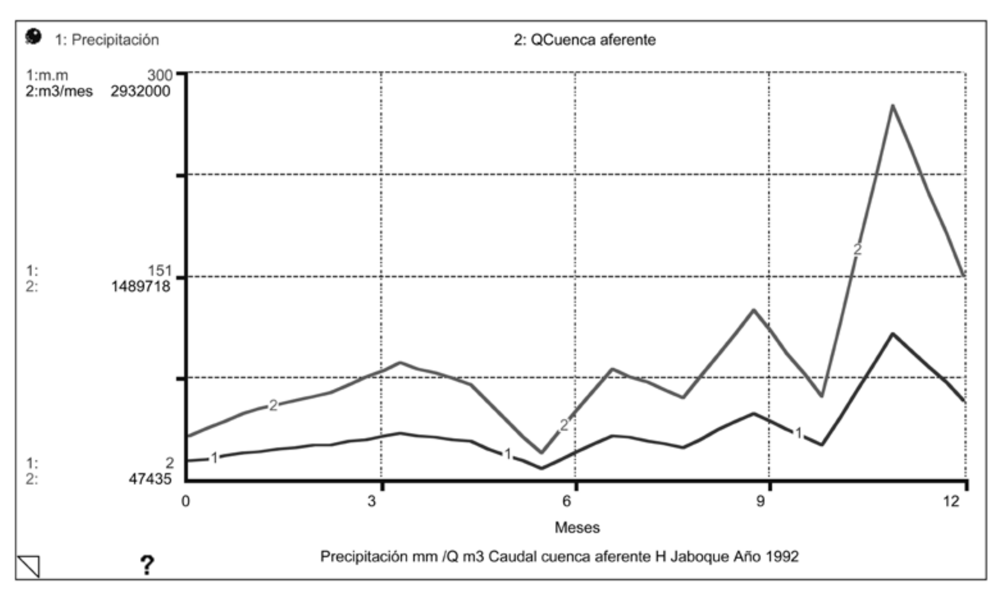


Figura 3. Modelación de la descarga de la cuenca aferente al humedal Jaboque. Año 1992 (Año fenómeno de El Niño).
1: Precipitación en mm. 2: Q cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m3/mes.

que el hidroperiodo se caracteriza por una alta variabilidad que depende de las condiciones climatológicas globales. Esta situación confirma que los fenómenos climáticos globales afectan fenómenos físicos locales de suma importancia, como es el comportamiento del hidroperiodo en el humedal, lo que afecta los procesos biogeoquímicos y biológicos (Hakanson *et al*. 2003).

El comportamiento hidrológico, años 2004 – 2005

La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones del volumen (m^3) de agua del humedal en sus tres secciones, con relación a los caudales de entrada, y en especial al proveniente de los canales Ángeles y Carmelo. Estos recogen las aguas provenientes de sus respectivas cuencas aferentes en la sección uno (Figura 5). También se incluye la entrada de la precipitación efectiva (mm) para cada una de sus secciones. Todo esto se estableció para el periodo comprendido entre los años 2004 y 2005 (24 meses), época en que se realizaron los estudios de investigación para la restauración ecológica del humedal. Se determinó el THR para cada una de las secciones, así como para la totalidad del humedal Jaboque.

- Sección uno - zona intervenida (tercio alto)

El volumen del tercio alto depende fundamentalmente de la descarga de la cuenca aferente, debido en parte a que las estructuras que recogen el caudal proveniente de los canales Carmelo y Los Ángeles se encuentran "encausadas" por estructuras perimetrales que dirigen los excesos de caudal hacia la parte media del humedal. En la figura 5 se muestran los resultados de la simulación de la descarga de la cuenca aferente y del comportamiento del volumen de la sección para los años 2004 y 2005. En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (66 137 m^3), mayo (70 643 m^3), octubre (72 447 m^3) y noviembre (67 643 m^3). Estos corresponden a los meses con mayores precipitaciones.

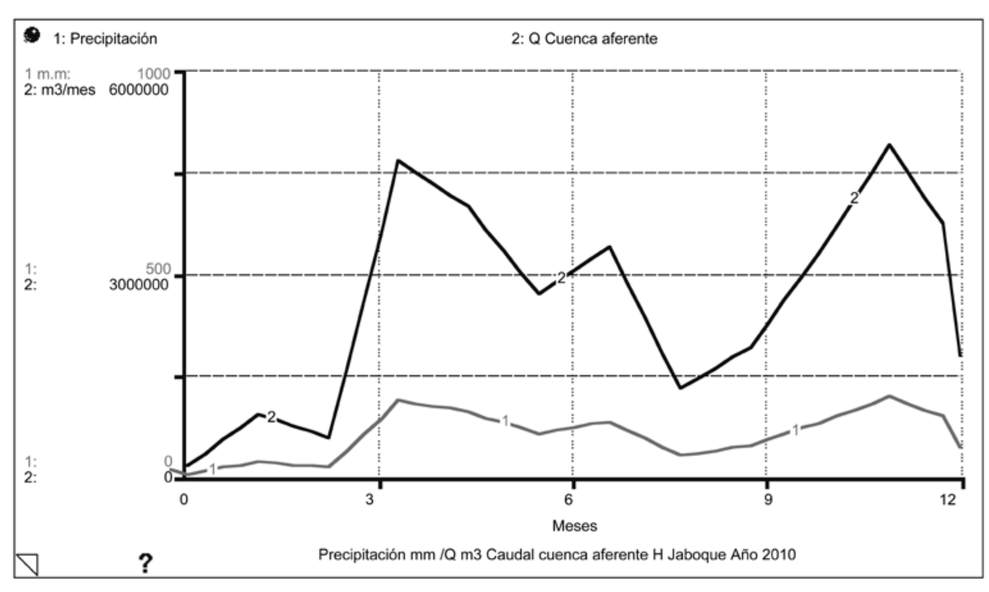


Figura 4. Modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque. Año 2010 (Año fenómeno de La Niña).
1: Precipitación en mm. 2: Q cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m3/mes.

Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (50 300 m^3), febrero (53 976 m^3) y diciembre (61 500 m^3), meses con menores valores en precipitación. En el año 2005 los mayores almacenamientos de agua ocurrieron en abril (66 400 m^3), mayo), (74 643 m^3), octubre (71 888 m^3) y noviembre (70 500 m^3), que fueron los meses con mayores lluvias. Los menores almacenamientos de agua se dieron en enero (58 300 m^3), febrero (62 551 m^3) y agosto (59 200 m^3), meses con bajos valores en precipitación. Se compararon los datos medidos y simulados mediante un análisis de regresión entre los dos grupos. Se encontró una buena correspondencia, $r^2 = 0.704$ ($y = 0.8692x+23033$). La diferencia entre los valores estimados y observados podría deberse en parte a las alteraciones morfométricas que ha sufrido esta sección y en especial a la construcción de los canales perimetrales y de las materas centrales, que originaron una morfometría compleja en esta sección. Las diferencias entre el comportamiento del caudal y el volumen de esta sección se deben en parte al THR, que es de quince días en promedio.

- Sección dos - zona de transición (tercio medio)

Esta sección se diferencia el tercio alto porque se encuentra medianamente intervenida por obras civiles y recibe agua por escurrimiento y a través de pequeñas aberturas localizadas en los camellones que delimitan la sección. En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril con 204 071 m^3, mayo con 197 066 m^3, octubre con 210 747 m^3 y noviembre con 201 478 m^3; estos fueron los meses con mayores precipitaciones. El menor almacenamiento de agua se presentó en enero (161 556 m^3), febrero (198 801 m^3), agosto (176 705 m^3) y diciembre (187 598 m^3), meses con menores lluvias. En el año 2005 los mayores almacenamientos de agua se dieron en los meses más lluviosos, es decir en abril 212 779 m^3), mayo (223 328 m^3), septiembre (191 882 m^3), octubre (204 788 m^3) y noviembre (203 130 m^3). Los meses con menor precipitación fueron también los de menos almacenamiento de agua (enero con 182 411 m^3, febrero con 189 295 m^3, agosto con 188 581 m^3 y diciembre con 190 496 m^3). En la descarga proveniente del tercio alto,

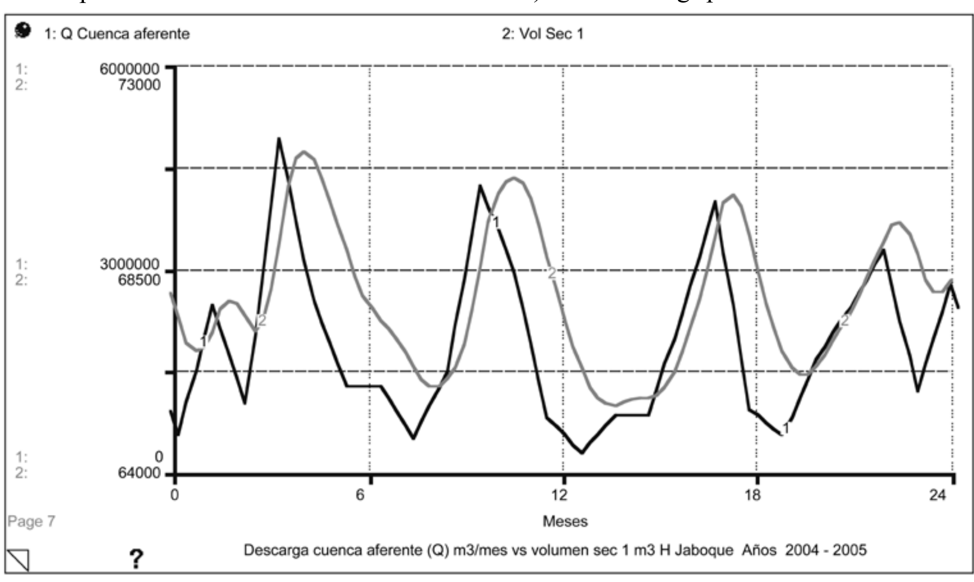


Figura 5. Descarga Cuenca aferente Jaboque vs Volumen Sección 1. Años 2004 – 2005.
1: Q Cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m3/mes. 2: Vol. Sección 1 – Variación mensual del Volumen sección 1 en m3/mes.

las variaciones del volumen fuero), n perceptibles y se presentaron algunas inundaciones en los barrios de marginales (ADESA 2004). Sin embargo, su intensidad se vio reducida en el flanco sur debido a la construcción de un canal interceptor que recoge las aguas de escorrentía provenientes del costado Sur del humedal. Al comparar los volúmenes estimados y los simulados se encontró una correlación aceptable, con un nivel de explicación de $r^2 = 0.7181$ (y=0.3857x+84833). Las variaciones entre el volumen calculado y el volumen simulado en esta sección pueden obedecer en parte a las discontinuidades batimétricas debidas a la construcción de jarillones posiblemente de origen precolombino (Van der Hammen 2003, Muñoz 2004). Este patrón se replica en el tercio bajo, donde hay múltiples puntos de acumulación y transporte de sedimentos.

- Sección tres - zona conservada (tercio bajo)

Esta sección, a diferencia de las dos primeras, es la de mayor extensión del sistema con 315 308.4 m^2 y un volumen de agua de 230 175 m^3 (Izquierdo 2005). Muestra buena capacidad para almacenar agua y amortiguar crecientes en épocas de altas descargas. En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron los más lluviosos (abril con 245 155 m^3, mayo con 236 697 m^3, junio con 222 476 m^3, octubre con 253 216 m^3 y noviembre con 242 024 m^3). Los de menor almacenamiento de agua fueron a su vez los más secos (enero con 193 820 m^3, febrero con 202 537 m^3 y agosto con 212 111 m^3). En el año 2005 los mayores almacenamientos de agua ocurrieron en abril (255 669 m^3), mayo (265 992 m^3), octubre (246 020 m^3) y noviembre (239 621 m^3), que corresponden a los meses con mayores precipitaciones. El menor almacenamiento se dio en los meses menos lluviosos (enero con 219 001 m^3, febrero con 227 314 m^3, agosto con 226 451 m^3 y diciembre con 223 067 m^3). Al igual que en las secciones anteriores, se encontró una buena correspondencia entre los valores calculados y simulados, con una explicación de $r^2 = 0.7125$ (y = 0.4627x+84609). Persiste una diferencia del 29% entre los valores calculados y simulados, que obedece a las complejas condiciones morfométricas (batimetría irregular coadyuvada por la construcción de diques y jarillones especialmente).

La fortaleza de predicción del modelo se verificó mediante la determinación del error relativo cercano a cero de 0.23 para la primera sección y de -0.17 para la segunda y tercera. El resultado permite considerar de manera positiva la utilización del modelo en estudios de caso similares, como son los demás humedales localizados al menos en la jurisdicción de Bogotá D.C.

Descarga al río Bogotá

El volumen total de agua del humedal se descarga hacia el río Bogotá a través de tres salidas o desfogues, dos localizadas en la parte Occidental del tercio alto, en el jarillón que separa al humedal del río Bogotá y otra, construida en el margen Norte de esta misma sección y que hace parte del jarillón – ciclo vía, que aísla el humedal de su antigua área natural de desborde. Una comparación entre los caudales de entrada y salida del humedal Jaboque (Figura 6) muestran una diferencia bruta de 82 165 m^3/mes para un total anual de 985 980 m^3/año, con lo cual el promedio del THR es de 93 días, es decir que el humedal, en las condiciones actuales recambia su volumen cuatro veces al año. Las diferencias entre el patrón de comportamiento del volumen con relación a los caudales de entrada se explican por el THR de la sección. En la figura 6 se muestran los resultados de la modelación del comportamiento de la descarga de la cuenca aferente, la descarga al río Bogotá y del volumen de la tercera sección. Nótese que existe coincidencia entre el patrón de picos y valles de cada curva, tanto para los meses de mayores precipitaciones como para los más secos.

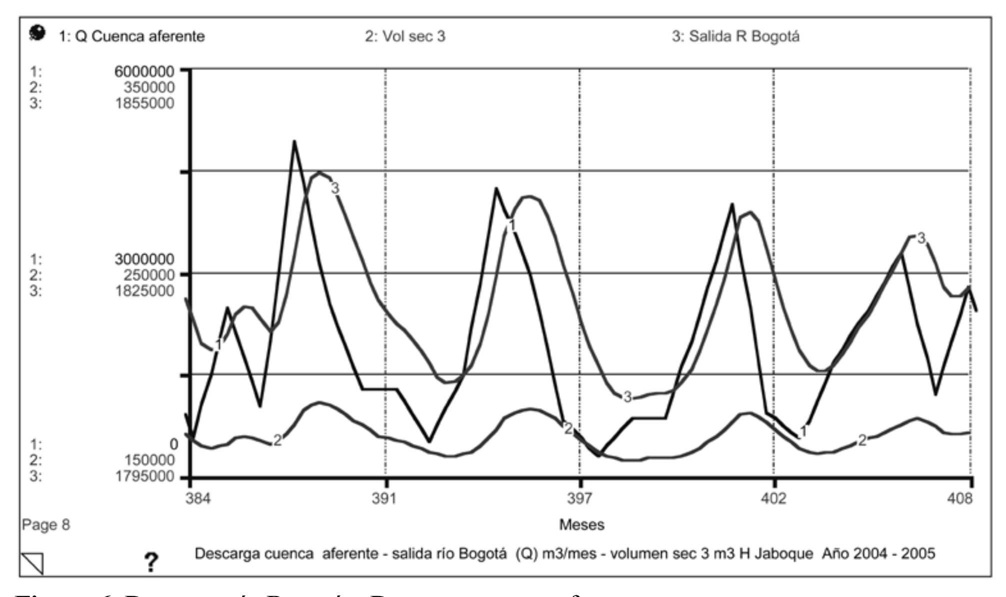


Figura 6. Descarga río Bogotá – Descarga cuenca aferente.
1: Q Cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m3/mes. 2: Salida río Bogotá, en m3/mes.

Tiempo Hidráulico de Retención (THR)

Cada sección tiene un comportamiento del THR diferente, debido principalmente a las características morfométricas: volumen, área, profundidad de la cubeta, patrón irregular del fondo y la presencia de diques artificiales de origen precolombino y colonial. El THR mensual promedio del primer tercio corresponde a quince días, para la sección intermedia el promedio es de 36 días y en el tercer tercio es de 42 días (Figura 7). Estas cifras superan los valores mínimos recomendados para épocas de verano según Zhang & Mitsch (2005), establecidos para el tratamiento de aguas residuales en lagunas facultativas.

En la figura 8 y en la tabla 4 se muestran los resultados de la modelación del comportamiento de la precipitación y del THR durante el periodo El Niño de 1992. El THR correspondiente a una precipitación mínima de 8.8 mm fue de 108 días año para la primera sección y de 265 días año y 314 días año para la segunda y tercera sección. Esto indica que a menores precipitaciones el THR aumenta, mientras que con la precipitación de 108.8 mm en diciembre, el THR fue de 9 días en la primera sección, de 22 en la segunda y de 27 en la tercera. En consecuencia, el THR disminuye con las mayores precipitaciones. En la figura 9 y la tabla 5 se muestran los resultados de la modelación del comportamiento de la precipitación y del THR en las tres secciones para el año 2010, en el que se presentó el fenómeno de La Niña. En enero y marzo las precipitaciones fluctuaron entre 6.3 mm y 23.2 mm. En estos meses los THR para la primera sección se estimaron entre 41 y 152 días, para la segunda sección entre 102 y 365 días y para la tercera entre 121 y 420 días. Cuando la precipitación se incrementó a valores entre 51.8 mm y 76.4 mm en agosto y septiembre, los THR fluctuaron entre 13 y 20 y días en la primera sección, 32 y 48 días en la segunda y 22 y 38 días en la tercera. En los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo, junio y julio) las precipitaciones fluctuaron entre 187.3 mm y 136.7 mm y los THR para la primera sección se estimaron entre 5 y 8 días, para la segunda sección entre 13 y 24 días/año y para la tercera entre 16 y 22 días.

En octubre y noviembre las precipitaciones alcanzaron los 132.9 mm y 136.6 mm respectivamente; en estas condiciones retención hidráulica mostró los valores más bajos. La sección uno tuvo un THR que fluctúo entre 8 y 5 días, en la segunda varió entre 13 y 19 días y en la tercera osciló entre 16 y 22 días. Los resultados evidencian que en época húmeda disminuye notablemente el THR, lo que indica un mayor transporte de agua en las cubetas del humedal y esto posiblemente incrementa el lavado de nutrientes, como lo sugiere Jørgensen (2003).

Tabla 4. Resultados de la modelación del THR, año 1992.

Meses	Precipitación mensual (mm)	Sección 1 THR DÍAS	Sección 2 THR DÍAS	Sección 2 THR DÍAS
Enero	14	69	169	199
Febrero	22.1	43	107	127
Marzo	26.2	36	90	108
Abril	35	27	68	81
Mayo	28.4	34	83	99
Junio	8.8	108	265	314
Julio	33.3	29	71	85
Agosto	24.5	39	96	115
Septiembre	49.7	19	48	57
Octubre	25.4	38	93	111
Noviembre	108.3	9	22	27
Diciembre	59.4	17	41	49
Promedio multianual	36	39	96	114
Desviación estándar	26.60	26.56	64.94	76.52

Análisis de sensibilidad del modelo

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta como variable independiente el promedio anual de precipitación en la zona (P) en la cuenca aferente, y como variables dependientes la descarga al río Bogotá (Tabla 5) y el THR para las tres secciones. Para ambos casos, las variaciones de la precipitación se establecieron 10 clases entre 400 mm/año y 1300 mm/año, a partir del comportamiento de los valores extremos de la precipitación en la cuenca aferente, entre los años de 1990 y 2010 (Tabla 3). Se puede observar (Figura 10 y Tabla 7) que en la medida en que aumenta la precipitación aumenta la descarga hacia el rio Bogotá, debido a que el tercio bajo recibe el mayor impacto de la descarga de la cuenca aferente. Se corrobora así el supuesto de que en condiciones extremas de precipitación el humedal se convierte en un canal de paso de aguas lluvias, ya que el THR disminuye a medida que aumenta la velocidad de transporte de agua en la sección. Cuando aumenta la descarga de la cuenca aferente los tiempos de retención disminuyen en cada sección (Figu-

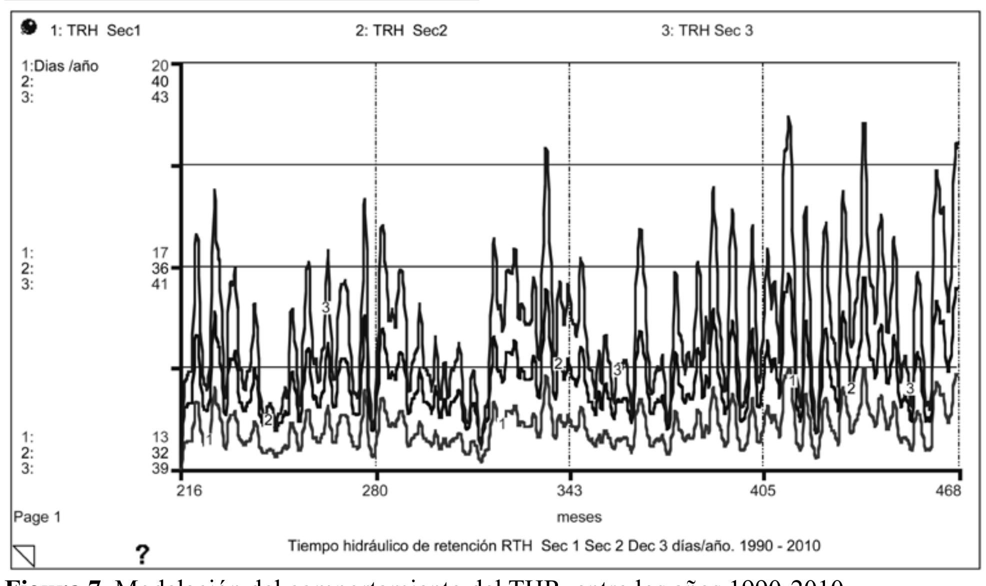


Figura 7. Modelación del comportamiento del THR, entre los años 1990-2010.
1: Tiempo hidráulico de retención Sección 1 días. 2: Tiempo hidráulico de retención Sección 2 días. 3: Tiempo hidráulico de retención Sección 3 días.

ras 11,12 y 13 y Tabla 7), ya que se aumenta el volumen de agua que se transporta entre cada sección del humedal. La variabilidad entre valores mínimos de precipitación (por ejemplo los relacionados con el fenómeno de El Niño) muestra que a promedios de precipitación entre 400 mm/año y 600 mm/año, el THR oscila entre 20 y 30 días para la sección uno, 48 y 72 días para la sección dos y 57 y 84 días para la sección tres (Tabla 7). En condiciones de alta precipitación, correspondientes al fenómenos de La Niña (entre 1.200 y 1.300 mm/año), el THR se reduce de manera significativa. Para la primera sección los valores son de 9 y 10 días, para la segunda de 22 y 24días y para la tercera sección de 27 y 29 días. Estos resultados concuerdan con las modelaciones del THR realizados para un año Niño 1992 y un año Niña 2010, con lo cual se comprueba el carácter predictivo del modelo.

Tabla 5. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 2010.

Meses	Precipitación mensual (mm)	Sección 1 THR DÍAS/ AÑO	Sección 2 THR DÍAS/ AÑO	Sección 3 THR DÍAS/ AÑO
Enero	6.3	152	365	420
Febrero	36.6	26	65	77
Marzo	23.2	41	102	121
Abril	187.3	5	13	16
Mayo	160.3	7	16	19
Junio	107.8	10	24	28
Julio	136.7	8	19	22
Agosto	51.8	20	48	57
Septiembre	76.4	13	32	38
Octubre	132.9	8	19	22
Noviembre	196.6	5	13	16
Diciembre	72.1	15	36	42
Promedio	99	26	62	73
Desviación estándar	64.26	41.28	98.68	113.55

DISCUSIÓN

Los resultados de la modelación hidrológica del humedal, permiten detectar una fuerte relación entre los montos y distribución de la precipitación de la cuenca aferente y los procesos hidrológicos del humedal. Esto se manifiesta en las tres secciones del humedal de manera distinta. Se definió un patrón estacional del nivel del agua para cada sección. El promedio anual de la precipitación para este periodo fue de 828.86 mm y el promedio de la descarga estimada de la cuenca aferente fue 1 718 646 m^3, lo cual evidencia un alta

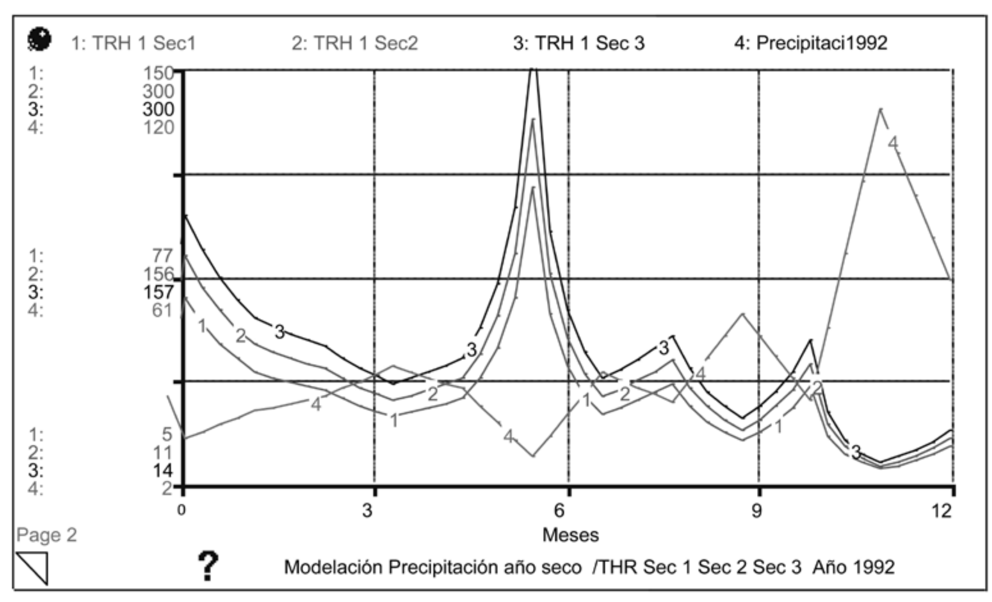


Figura 8. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 1992. Año Niño.
1: Tiempo hidráulico de retención Sección 1 días. 2: Tiempo hidráulico de retención Sección 2 días/año. 3: Tiempo hidráulico de retención Sección 3 días. 4: Precipitación mensual mm.

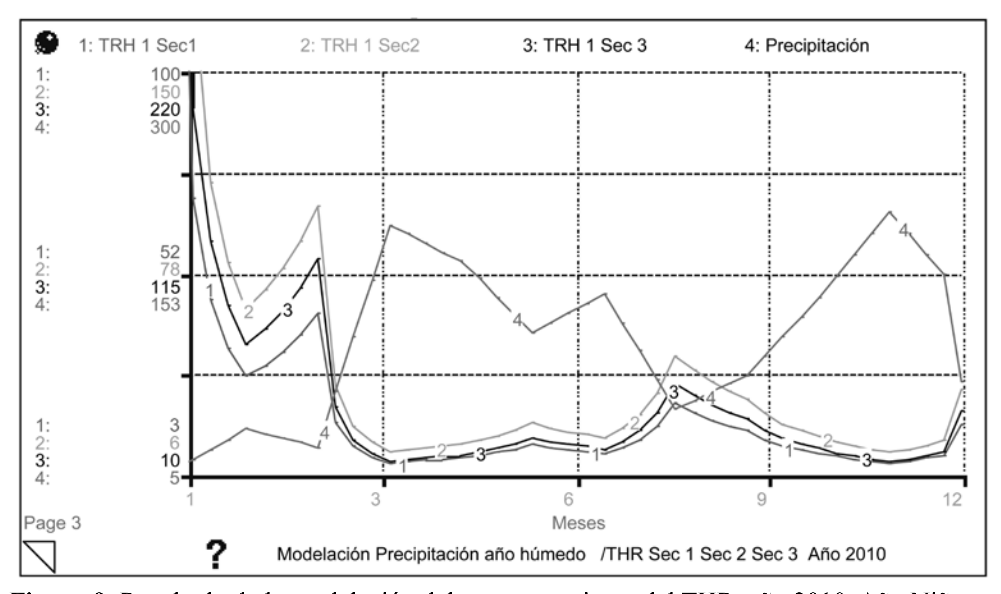


Figura 9. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 2010. Año Niña.
1: Tiempo hidráulico de retención Sección 1 días/año. 2: Tiempo hidráulico de retención Sección 2 días/año. 3: Tiempo hidráulico de retención Sección 3 días/año. 4: Precipitación mensual mm.

Tabla 6. Variables del análisis de sensibilidad precipitación/flujo salida río Bogotá.

Serie	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Clases: Prec/mm	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Salida rio Bogotá m3/mes	928 614	1 148 444	1 368 274	1 588 105	1 807 935	2 027 765	2 247 595	2 467 426	2 687 256	2 907 086

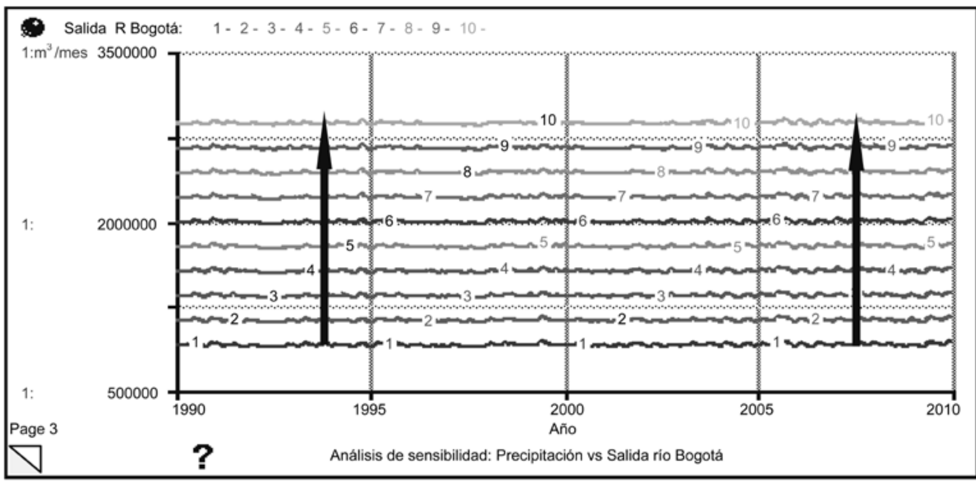


Figura 10. Análisis sensibilidad precipitación – flujo salida río Bogotá.

Tabla 7. Variables del análisis de sensibilidad – precipitación Sección 1, Sección 2, Sección 3.

SERIE	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Clases en : Precipitación/mm	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
THR Sección 1: Días/año	30	24	20	17	15	13	12	11	10	9
THR Sección 2: Días/año	72	58	48	41	36	32	29	27	24	22
THR Sección 3: Días/año	84	68	57	49	43	38	35	32	29	27

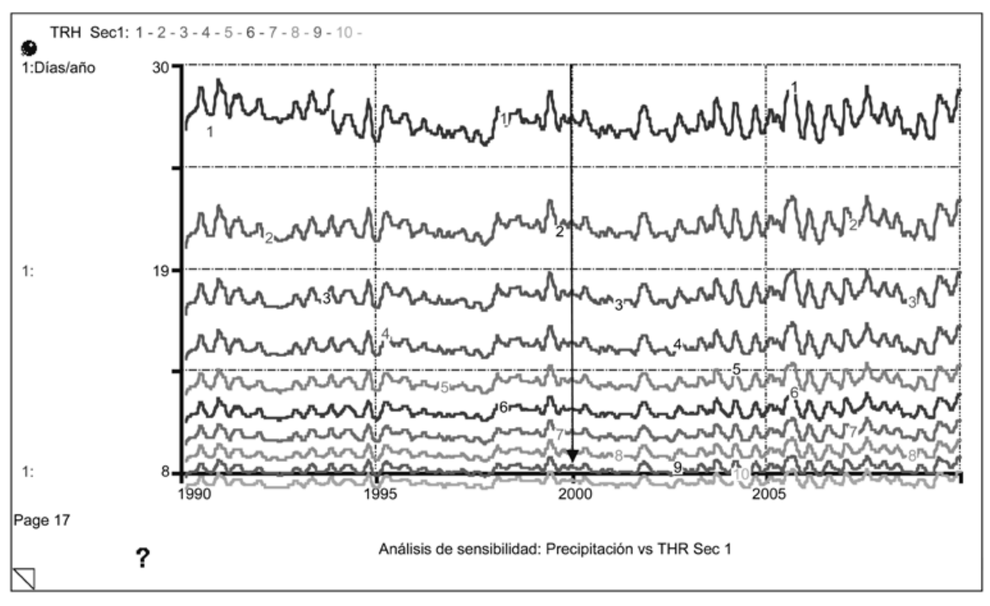


Figura 11. Análisis de sensibilidad Precipitación vs THR Sección 1.

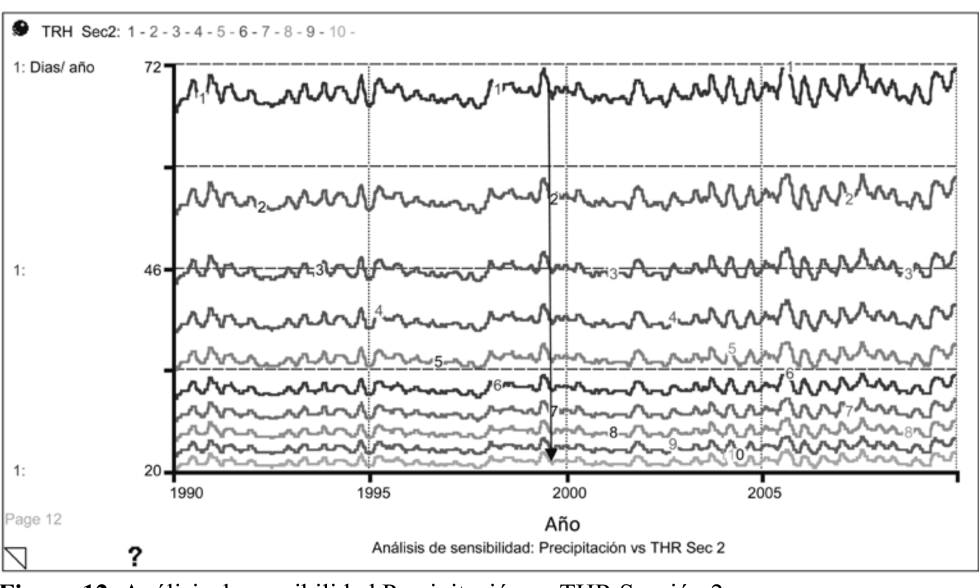


Figura 12. Análisis de sensibilidad Precipitación vs THR Sección 2.

variabilidad entre los valores extremos de la precipitación y la descarga de agua al humedal de Jaboque. La dinámica hidrológica modifica el tiempo hidráulico de retención (Carpenter *et al.* 2008), lo que incide en los procesos geoquímicos y biológicos del humedal. La comparación entre los caudales de entrada y salida del humedal Jaboque muestran una diferencia bruta de 82 165 m^3/mes para un total anual de 985980 m^3/año. La modelación entre las entradas y salidas de agua al sistema reproducen de manera parcial el aporte de aguas de Jaboque al río Bogotá, pero también reconfirman el papel amortiguador que tienen

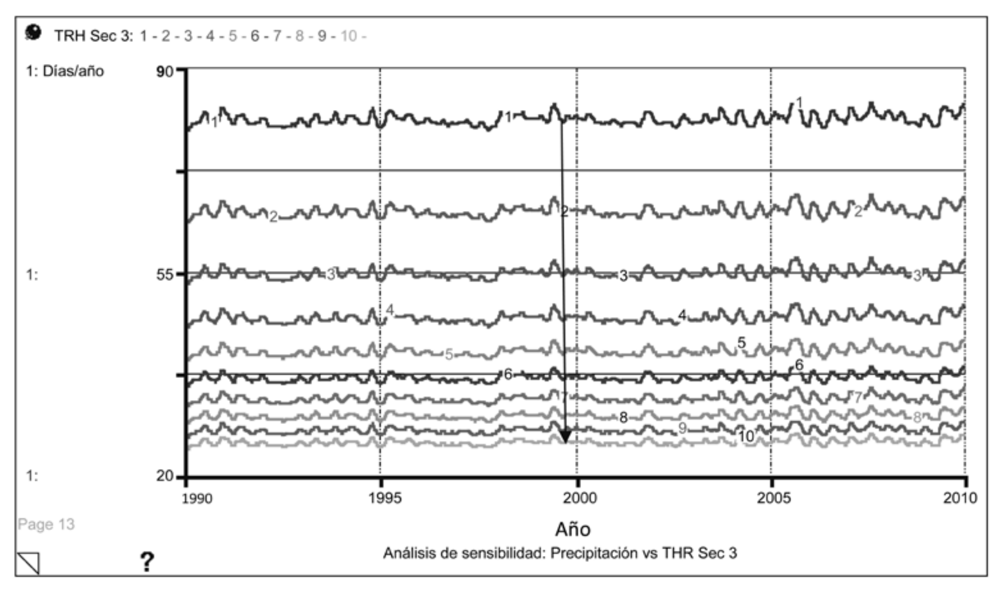


Figura 13. Análisis de sensibilidad Precipitación vs THR Sección 3.

todas las secciones del humedal, y en especial la segunda y tercera sección, al recibir y atenuar el impacto de las crecientes de la cuenca aferente del cuerpo de agua.

El volumen de agua en la primera sección depende fundamentalmente de la descarga de la cuenca aferente y la precipitación, en parte por las estructuras que recogen el caudal proveniente de los canales Carmelo y Los Ángeles, la segunda sección recibe los aportes del tercio alto y la precipitación, y la tercera sección la descarga del tercio medio y amortigua las crecientes fuertes de las dos primeras secciones. Las condiciones climáticas de la zona se reflejan en el comportamiento del hidroperiodo. El mayor volumen de agua de cada sección se presentó en los meses de abril – mayo y octubre – noviembre, con descensos en los meses de diciembre – enero y julio – agosto. La comparación de los volúmenes de agua estimados y calculados para todas las secciones indica que es necesario disponer de datos de los parámetros morfométricos con mayor detalle, en especial los que hacen referencia a la batimetría del humedal que es compleja y dinámica, debido a los procesos de colmatación que ha sufrido el humedal. La modelación del THR permitió establecer una aproximación al rol hidrológico y ecológico que juega cada sección en el contexto del humedal. Se infiere que la tercera sección cumple una función reguladora y quizá de estabilizador fisicoquímico y biológico. Se confirma así, que el comportamiento del THR permite amortiguar el impacto de la contaminación difusa ocasionada por múltiples vertimientos ilegales en la cuenca aferente.

Los resultados del análisis de sensibilidad permitieron comparar situaciones de variabilidad climática extrema, un año seco con el fenómeno de El Niño y un año húmedo con el fenómeno de La Niña. Los tercios medio y bajo del humedal desempeñan un rol importante como depuradores en estas condiciones climáticas extremas. En condiciones cercanas al monto promedio de la precipitación las secciones dos y tres (que tienen la mayor superficie) estarían asumiendo la función depuradora del ecosistema; mantener esta condición sería la situación más apropiada para el humedal. Los resultados de la modelación indican que las variables de precipitación, caudal de la des-

carga de la cuenca aferente, profundidad, área de la cubeta y volumen almacenado, permiten comprender el comportamiento del THR, motivo por el cual estas variables se deberían tener en cuenta para futuras investigaciones relacionadas con medidas de restauración y conservación del humedal.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación de la Universidad Nacional de Colombia – Instituto de Ciencias Naturales y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB – ESP, por el aporte de la información relacionada con el estudio de caso. A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Rectoría, a la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales por el apoyo económico otorgado para realizar el programa de doctorado. Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico – CIIDC – y al Grupo de Investigación INDESOS, que apoyaron la financiación para la adquisición de los programas computacionales, el equipo de computo y la bibliografía especializada que se utilizó en la investigación.

LITERATURA CITADA

Acreman, M., J. Fisher, C. Stratford, D. Mould, D & J. Mountford, J. 2007. Hydrological science and wetland restoration: some case studies from Europe. Hydrology and Earth System Sciences 11(1): 158–169.

Adesa. 2004. *Plan de manejo integral y comunitario para la recuperación y protección del humedal El Jaboque ubicado en la localidad de Engativá.* Bogotá D.C.

Almendinger, J. 1999. A method to prioritize and monitor wetland restoration for water-quality improvement. Wetlands Ecology and Management 6(4): 241–252.

IDEAM. 2010. *Registros climatológicos del Sistema de Información Hidrometereológica.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM. Bogotá D.C.

Bradley, C. & D. Gilvear, 2000. Saturated and unsaturated flow dynamics in a floodplain wetland. Hydrological Processes 14(16-17): 2945–2958.

Bryhn, A. & L. Håkanson. 2007. A comparison of predictive phosphorus load-concentration models for lakes. Ecosystems 10(7): 1084–1099.

Carpenter, S., N. Caraco, D. Correll, D. Howarth, R. Sharpley & V. Smith. 2008. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecological Applications 8(3): 559–568.

Duever, M., W. Mitsch, M. Straskraba & S. Jørgensen, S. 1988. *Wetland Modelling.* Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam. 238 pp.

Hakanson, L. & H. Peters. 1995. *Predictive limnology: methods for predictive modelling.* SPB Academic publishing, Amsterdam. 464 pp.

Håkanson, L. & V. Boulion. 2002. *The lake foodweb: modelling predation and abiotic/ biotic interactions.* Backhuys Publishers, Amsterdam.

Håkanson, L. 1999. On the principles and factors determining the predictive success of ecosystem models, with a focus on lake eutrophication models. Ecological Modelling 121(2-3): 139–160.

Håkanson, L. 2004. Break-through in predictive modelling opens new possibilities for aquatic ecology and management a review. Hydrobiologia 518(1): 135–157.

Hakanson, L. 2005. The importance of lake Morphometry for the structureand function of lakes. International Review of Hydrobiology 90(4): 433–461.

Håkanson, L., A. Ostapenia, A. Parparov, K. Hambright & V. Boulion. 2003. Management criteria for lake ecosystems applied to case studies of changes in nutrient loading and climate change. Lakes & Reservoirs: Research & Management 8(2): 141–155.

HUPP, C. 2000. Hydrology, geomorphology and vegetation of Coastal Plain rivers in the south-eastern USA. Hydrological Processes 14(16-17): 2991–3010.

IZQUIERDO, D. 2005. *Modelación hidráulica del humedal Jaboque.* Informe final convenio de cooperación Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá D.C. - Universidad Nacional de Colombia - Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá D.C.

JØRGENSEN, S. & G. BENDORICCHIO. 2001. *Fundamentals of ecological modeling.* Elsevier Science Ltda, Amsterdam.

JØRGENSEN, S. 2008. Overview of the model types available for development of ecological models. Ecological Modelling 215(1-3): 3–9.

JØRGENSEN, S. E. 2003. The aplication of models to find the relevance of residence time in lake and reservoir management. Papers from Bolsena Conference en Papers from Bolsena Conference: Residence time in lakes: science, Management, Education. Limnology 62: 16–20.

KADLEC, R. 1990. Overland flow in wetlands: vegetation resistance. Journal of Hydraulic Engineering 116: 691–707.

KADLEC, R. 1994. Detention and mixing in free water wetlands. Ecological Engineering 3(4): 345–380.

KNIGHT, R. 2000. Constructed wetlands for livestock wastewater management. Ecological Engineering 15(1-2): 41–55.

LEGENDRE, P. & L. LEGENDRE. 1998. *Numerical Ecology.* Vol. 20 Elsevier Science, Ámsterdam. 870p.p

MANCERA, J., E. PEÑA, R. GIRALDO & A. SANTOS. 2003. *Introducción a la modelación ecológica. Principios y aplicaciones.* Universidad Nacional de Colombia. San Andrés. 109 p.p

MITSCH, W. & J. DAY. 2004. Thinking big with whole-ecosystem studies and ecosystem restoration-a legacy of H.T. Odum. Ecological Modelling 178(1-2): 133–155.

MITSCH, W. & J. GOSSELINK. 2000. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. Ecological Economics 35(1): 25–33.

MITSCH, W., A. NAHLIK, P. WOLSKI, B. BERNAL, L. ZHANG. & L. RAMBERG. 2009. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. Wetlands ecology and management 18(5): 573–586.

MUÑOZ, J. M. 2004. *Humedal Jaboque, evolución geomorfológica y geológica, y su relación con las culturas prehispánicas.* Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geología. Bogotá D.C.

MUÑOZ, J. M., & J. JARAMILLO. 2005. *Evaluación geológica – geomorfológica del humedal Jaboque. Plan de restauración ecológica del humedal del Jaboque.* Informe final. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

QUINN, N. & W. HANNA. 2003. A Decision Support System for Adaptive Real-Time Management of Seasonal Wetlands in California. Environmental Modelling and Software 18(6): 503–511.

RANGEL,CH., J. O. (COMPILADOR). 2005. Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque. Convenio Acueducto de Bogotá – Universidad Nacional de Colombia, Informe final. Bogotá D.C.

SIERRA, O. R. & C. A., MONSALVE. 2005. Zonificación trófica del humedal Jaboque, con base en la familia Bacillariophyceae, Engativá. En: Rangel-Ch., J. O. (Compilador). Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque. Convenio Acueducto de Bogotá – Universidad Nacional de Colombia, Informe final. 1 – 23 p. SPIELES, D. & W. MITSCH. 2003. A model of macroinvertebrate trophic structure and oxygen demand in freshwater wetlands. Ecological Modelling 161(3): 181–192.

VAN DER HAMMEN, T. 1995. *Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y*

alrededores. Análisis Geográficos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Bogotá D.C.

Van Der Hammen, T. 2003. Los humedales de la sabana. Origen, evolución, degradación y restauración. En: A. Guarnizo, & B. Calvachi. *Los humedales de Bogotá y la Sabana*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – Conservación Internacional, Bogotá D.C.

Werner, T. & R. Kadlec. 1996. Application of residence time distributions to stormwater treatment systems. Ecological Engineering 7(3): 213–234.

Werner, T. & R. Kadlec. 2000. Wetland residence time distribution modeling. Ecological Engineering 15(1-2): 77–90.

Wetzel, R. 2001. Fundamental processes within natural and constructed wetland ecosystems: short-term versus long-term objectives. Wetland Systems for Water Pollution Control 2000 44(11-12): 1–8.

Zhang, L. & W. Mitsch. 2005. Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. Environmental Modelling & Software 20(7): 935–946.

Recibido: 15/04/2012
Aceptado: 19/04/2013

Anexo 1. Ecuaciones del modelo de simulación ecológica humedal jaboque – componente hidrológico.

```
Vol_Sec_1(t) = Vol_Sec_1(t - dt) + (Flujo_Cuenca__Aferente + Pre_sec_1 - Flujo_Sec_2 - Evapo) * dt
INIT Vol_Sec_1 = 64018
INFLOWS:
Flujo_Cuenca__Aferente = Prom_anual_de_Q_año
Pre_sec_1 = (P_ef_Sec_1*10^-1)
OUTFLOWS:
Flujo_Sec_2 = Vol_Sec_1-Vol_m_sec_1+Flujo_Cuenca__Aferente
Evapo = Y_evaporacion* Area_sec_1
Vol_sec_2(t) = Vol_sec_2(t - dt) + (Flujo_Sec_2 + Pre_sec_2 - Flujo_Sec_3 - Eva_2) * dt
INIT Vol_sec_2 = 159221
INFLOWS:
Flujo_Sec_2 = Vol_Sec_1-Vol_m_sec_1+Flujo_Cuenca__Aferente
Pre_sec_2 = (P_ef_Sec_2*10^-1)
OUTFLOWS:
Flujo_Sec_3 = Vol_sec_2-Vol_m_sec_2+Flujo_Sec_2
Eva_2 = Y_evaporacion* Area_sec_2
Vol_sec_3(t) = Vol_sec_3(t - dt) + (Flujo_Sec_3 + Pre_sec_3 - Salida__R_Bogotá - Eva_3) * dt
INIT Vol_sec_3 = 191000
INFLOWS:
Flujo_Sec_3 = Vol_sec_2-Vol_m_sec_2+Flujo_Sec_2
Pre_sec_3 = (P_ef_Sec3*10^-1)
OUTFLOWS:
Salida__R_Bogotá = Vol_sec_3-Vol_m_sec3+Flujo_Sec_3
Eva_3 = Y_evaporacion* Area_sec_3
Area_de_cuenca_aferente = 5.7*10^6
Area_sec_1 = 116396
Area_sec_2 = 261132.4
Area_sec_3 = 315308
Continentalidad = 1250
Latitud = 4.74
msnm = 2547
Precipitación_anual = 1*828
```

Continuación Anexo 1. Ecuaciones del modelo de simulación ecológica humedal jaboque – componente hidrológico.

Prof_Sec3 = Vol_sec_3*Area_sec_3
Prof_Sec_1 = Vol_Sec_1/Area_sec_1
Prof_Sec_2 = Vol_sec_2/Area_sec_2
Prom_anual_de_Q_año = if P_emp=0 then
0*(0.38*Precipitación_anual*Area_de_cuenca_aferente*0.001)+1*(Area_de_cuenca_aferente*(Precipitación_anual/817.7)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
P_ef_Sec3 = if P_emp=0
then0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_3*0.001)+1*(Area_sec_3*(Precipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
P_ef_Sec_1 = if P_emp=0
then0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_1*0.001)+1*(Area_sec_1*(Precipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
P_ef_Sec_2 = if P_emp=0 then
0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_2*0.001)+1*(Area_sec_2*(Precipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_empP_emp = 0
Q__Cuenca_aferente = if P_emp=0 then
0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_de_cuenca_aferente*0.001)+1*(Area_de_cuenca_aferente*(Precipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
THR__Jt = ((Vol_Sec_1+Vol_sec_2+Vol_sec_3)/Salida__R_Bogotá)*365
TRH_1_Sec1 = (Vol_Sec_1/Flujo_Sec_2)*365
TRH_1_Sec2 = (Vol_sec_2/Flujo_Sec_3)*365
TRH_1_Sec_3 = (Vol_sec_3/Salida__R_Bogotá)*365
Vol_m_sec3 = 191000
Vol_m_sec_1 = 64018
Vol_m_sec_2 = 159221
Precipitacion_1972__2010 = GRAPH(MOD(TIME,468))
(1.00, 72.1), (2.00, 21.9), (3.00, 57.2), (4.00, 159), (5.00, 118), (6.00, 58.1), (7.00, 36.7), (8.00, 39.6), (9.00,17.4), (10.0, 71.6), (11.0, 101), (12.0, 28.5), (13.0, 2.90), (14.0, 3.80), (15.0, 50.1), (16.0, 39.3), (17.0, 75.0),(18.0, 59.5), (19.0, 55.1), (20.0, 57.4), (21.0, 130), (22.0, 115), (23.0, 106), (24.0, 117), (25.0, 79.6), (26.0,100), (27.0, 28.5), (28.0, 83.3), (29.0, 61.3), (30.0, 65.5), (31.0, 15.8), (32.0, 46.8), (33.0, 91.8), (34.0, 100),(35.0, 151), (36.0, 24.0), (37.0, 5.50), (38.0, 32.2), (39.0, 130), (40.0, 57.9), (41.0, 105), (42.0, 56.4), (43.0,60.3), (44.0, 52.2), (45.0, 55.1), (46.0, 161), (47.0, 70.7), (48.0, 77.9), (49.0, 31.2), (50.0, 59.9), (51.0, 118),(52.0, 122), (53.0, 104)...